

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.313:629.423

А. В. ДЕМИДОВ, Б. Г. ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук,
Т.В. ПАРФЕНЮК, НТУ «ХПИ» (г. Харьков)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПО МЕТОДУ ПРОСТРАНСТВЕННО ВЕКТОРНОЙ ШИМ ПРИ ПОСТОЯНСТВЕ АМПЛИТУДЫ СУММАРНОГО ВЕКТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Розроблено імітаційну модель, що реалізує алгоритм подачі керуючих імпульсів для тягового приводу за методою просторово-векторної ШІМ, що забезпечує постійність амплітуди сумарного вектору напруги.

A simulation model, realizing the algorithm of serve of managing impulses for a hauling drive on the method of space-vector PVM, is developed, providing constancy of amplitude of total vector of voltage.

В настоящее время большая часть пригородного пассажиропотока Украины перевозится устаревшим подвижным составом, не отвечающим современным нормам в области экономической эффективности [1]. Для повышения конкурентоспособности пассажирских перевозок на линиях с малым пассажиропотоком необходим новый эффективный подвижной состав, имеющий улучшенные характеристики, позволяющие снизить затраты на электроэнергию и эксплуатационные расходы.

Одним из главных недостатков существующего подвижного состава является неэффективный тяговый привод, состоящий из коллекторного тягового электродвигателя постоянного тока и контактно-реостатной системы регулирования. Мировая практика показала, что для пригородных перевозок наиболее перспективен непосредственный привод на базе двигателей переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

Создание высокоэффективного непосредственного тягового привода возможно при использовании высокомоментных тяговых двигателей и системы управления, обеспечивающей высокую энергетическую эффективность при разных частотах вращения и сравнительно равномерный момент при пуске. Наиболее полно таким требованиям отвечают синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов и метод управления силовыми транзисторами называемый пространственно-векторная ШИМ.

Целью работы является разработка имитационной модели, реализующей алгоритм подачи управляющих импульсов для тягового привода по методу пространственно-векторной ШИМ.

На рисунке 1 показана принципиальная схема привода, состоящая из двигателя переменного тока, подключенного к инвертору напряжения. Поскольку силовые ключи VS1, VS3, VS5 могут находиться только во включенном или отключенном состоянии и, при этом, ключи VS2, VS4, VS6 могут находиться только в противоположном состоянии (паузами неперекрывтия в данном случае пренебрегаем), то всего возможно восемь состояний силовой схемы управления, шесть из которых приводят к формированию ненулевых фазных напряжений.

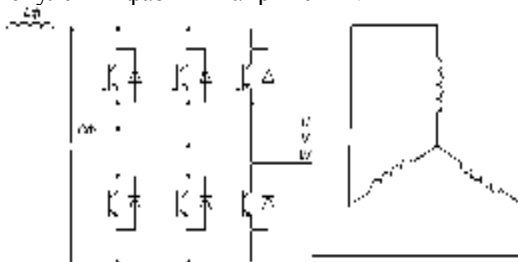


Рисунок 1 – Принципиальная схема инвертора напряжения синхронного двигателя.

Также существуют шесть переходных состояний, в которых открыто только по одному транзистору анодной и катодной групп. Если провести суммарные векторы напряжений, проходящих через обмотки статора, то начала векторов двенадцати ненулевых и переходных комбинаций будут находиться в вершинных равностороннего треугольника, а концы – в вершинах и серединах сторон этого треугольника.

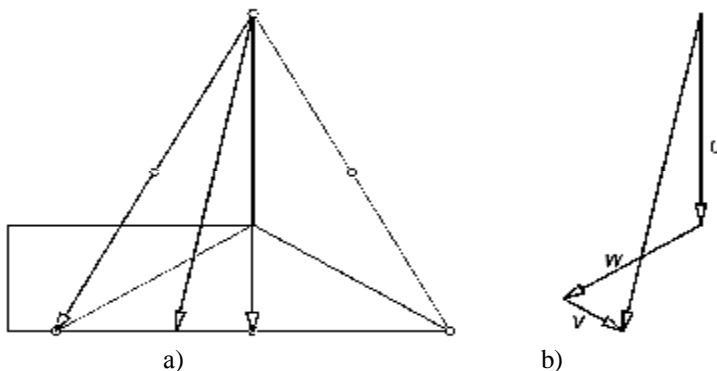


Рисунок 2. – а) работа системы пространственно-векторной ШИМ при положении суммарного вектора статора OC . б) векторная диаграмма, поясняющая получение вектора OC .

Последовательное переключение описанных двенадцати векторов создаст вращающийся вектор напряжения. Из-за дискретного характера вращения вектора напряжения, а, следовательно, и вектора потока статора,

угол управления будет переменным, что приведет к скачкам момента двигателя. Для подвижного состава с непосредственным приводом необходимо формирование не только 12 основных векторов напряжения, но и промежуточных между ними. В таком случае удастся максимально полно использовать двигатель, так как угол управления в этом случае будет поддерживаться системой управления близким к оптимальному (90 градусов), и получить плавный ход подвижного состава при малых скоростях движения. Принцип формирования промежуточного вектора напряжения, в данном случае соответствующего отрезку OC , приведен на рисунке 2.

Временной интервал, на который нужно открывать каждый модулирующий транзистор при любом положении суммарного вектора напряжения (в данном примере вектора OC) определяется длиной отрезков KL и LM , показанных слева от векторов напряжения (рисунок 2). Длина отрезка KL определяет интервал открытого состояния транзистора катодной группы фазы W , длина отрезка LM соответственно интервал открытого состояния транзистора катодной группы фазы V .

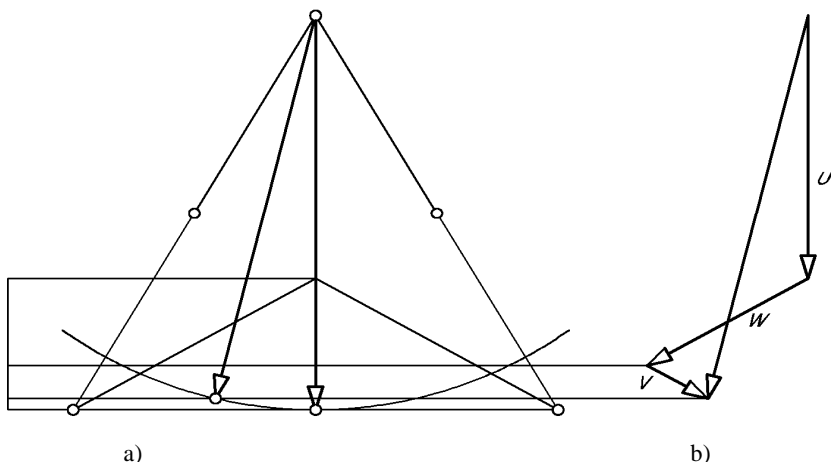


Рисунок 3– *a)* работа модифицированной системы пространственно-векторной ШИМ при положении суммарного вектора статора OC . *b)* векторная диаграмма, поясняющая получение вектора OC .

У схемы работы, показанной на рисунке 2, есть существенный недостаток. При положениях конца вектора в вершинах треугольника он больше вектора фазы в $\sqrt{3}$ раз, а при положении в середине стороны треугольника – больше в 1,5 раза. Следовательно, во время поворота вектора на 30° его длина будет постоянно меняться, и разница между самым коротким и самым длинным вектором равна $\frac{\sqrt{3}}{1.5} = 1.1547$ раза. Так как

момент двигателя напрямую зависит от тока, а следовательно и от напряжения статора, то он тоже будет изменяться в указанное число раз. Это приведет к рывкам силы тяги и вибрации двигателя, что для тягового электропривода неприемлемо. Одним из способов решения этой проблемы является ограничение длины суммарного вектора напряжения статора на уровне 1,5 фазного напряжения, что соответствует самому короткому суммарному вектору напряжений статора [2].

В уравнение, определяющее временные интервалы открытого состояния модулирующих транзисторов вводится еще одна переменная – длина отрезка MN , которая определяет насколько нужно уменьшить длину текущего суммарного вектора напряжения, чтобы привести его к 1,5 фазного напряжения. Эта величина определяет временной интервал, в течение которого оба модулирующих транзистора будут находиться в закрытом состоянии. Работа модернизированной таким образом системы показана на рисунке 3.

Так как тяговый двигатель синхронный, входной величиной для системы управления является сигнал с датчика положения ротора, а также сигналы обратных связей от датчиков тока и напряжения. Зная положение ротора двигателя, можно однозначно определить коэффициенты, соответствующие длинам отрезков KL , LM , MN . Измерив временной интервал между импульсами с датчика положения ротора можно определить частоту вращения двигателя, а, следовательно, и скорость движения подвижного состава.

После проведения геометрических преобразований получены выражения, определяющие работу системы модернизированной ШИМ.

Так как прикладываемое к двигателю напряжение изменяется, расчет ведется в относительных единицах, за единицу принят вектор фазного напряжения в фазе U , соответствующий положению вектора OB . Расчет ведется для участка, соответствующего повороту вектора суммарного напряжения статора с 0 по 60 градусов.

Коэффициент, соответствующий длине отрезка ML :

$$k_{ml} = \frac{1 - \frac{\tan(g_{\partial\partial\partial} + \frac{P}{180})}{\sqrt{3}}}{1 + \frac{\tan(g_{\partial\partial\partial} + \frac{P}{180})}{\sqrt{3}}}, \quad (1)$$

где γ_{pad} – угол, определяющий положение ротора.

Коэффициент, соответствующий длине отрезка MN :

$$k_{mn} = \frac{2 \cdot 1.5}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1 + k_{ml})^2 + 3 \cdot (1 - k_{ml})^2}}, \quad (2)$$

Коэффициент, соответствующий длине отрезка KL:

$$k_{kl} = (1 - k_{ml}) \cdot (1 - k_{mn}), \quad (3)$$

Согласно вычисленным коэффициентам определяются фазные напряжения:

$$\begin{aligned} U_U &= U_\phi \cdot (1 - k_{mn}) \\ U_V &= U_\phi \cdot k_{ml} (1 - k_{mn}) \\ U_W &= U_\phi \cdot (1 - k_{ml}) \cdot (1 - k_{mn}) \end{aligned} \quad (4)$$

Используя полученные выражения, была создана цифровая модель системы управления электропривода в пакете Matlab-Simulink [3]. В модели осуществлено управление транзисторами *VS1-VS6* и реализована система регулирования методом пространственно-векторной ШИМ. Для регулирования напряжения в звене постоянного тока используется импульсный регулятор. Для упрощения цифрового моделирования работа импульсного регулятора в модели не рассматривается, он заменен регулируемым источником напряжения. Также в работе приняты следующие допущения: транзисторы *VS1-VS6* идеальные ключи, обратные диоды – идеальные диоды, источник регулируемого напряжения имеет внутреннее сопротивление 10^{-7} Ом.

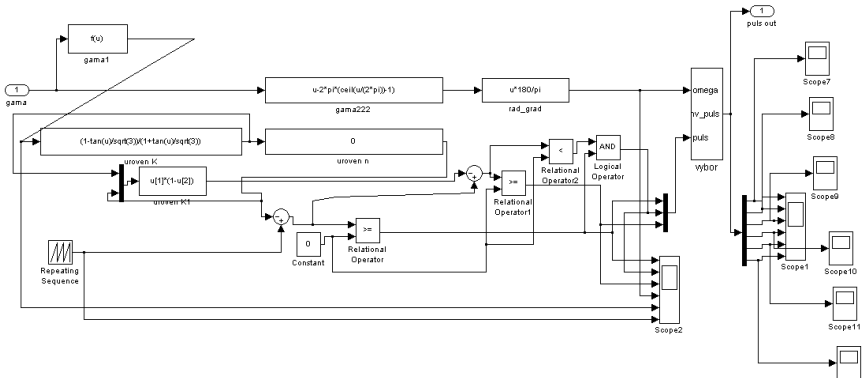


Рисунок 4 – Подсистема вычисления коэффициентов и генерирования управляющих импульсов.

Внешний вид блока модели, реализующего расчет коэффициентов для работы системы ШИМ и генерирование управляющих импульсов, приведен на рисунке 4.

Выводы:

В результате имитационного моделирования системы управления инвертором напряжения согласно методу пространственно-векторному ШИМ получены графики подачи управляющих импульсов на затворы силовых транзисторов.

Предложена методика формирования управляющих импульсов для инвертора напряжения в составе непосредственного привода с синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов, работающего по методу пространственно-векторной ШИМ.

Особенностью предложенной методики является стабилизация амплитуды суммарного вектора напряжения при любом положении ротора.

Разработана имитационная модель, реализующая алгоритм подачи управляющих импульсов для тягового привода по методу пространственно-векторной ШИМ, обеспечивающий постоянство амплитуды суммарного вектора напряжения.

Список литературы: 1. LXVI Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» г. Днепропетровск 2006, *Омельяненко В.И., Любарский Б.Г., Бойко А.И. Демидов А.В.* Тяговый электропривод для подвижного состава железных дорог Украины. 2. Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors. – Texas Instruments Europe, Literature Number: BPRA073. February 1998. 3. *Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н.* MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.: ил.

Поступила в редколлегию 26.11.2009